HAL
open science

Système complet de reconstruction 2,5D d'empreintes digitales : une étude de faisabilité

Laurent Condat, Vincent Roullier

To cite this version:

Laurent Condat, Vincent Roullier. Système complet de reconstruction 2,5D d'empreintes digitales : une étude de faisabilité. RFIA 2012 (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle), Jan 2012, Lyon, France. pp.978-2-9539515-2-3. hal-00656576

HAL Id: hal-00656576

https://hal.science/hal-00656576v1

Submitted on 17 Jan 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Système complet de reconstruction 2,5D d'empreintes digitales : une étude de faisabilité

Laurent Condat[1,2,3] Vincent Roullier[1,2,3]

[1] Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6072 GREYC, F-14032 Caen, France
[2] ENSICAEN, UMR 6072 GREYC, F-14050 Caen, France
[3] CNRS, UMR 6072 GREYC, F-14032 Caen, France

GREYC, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex
laurent.condat@ensicaen.fr

Résumé

Le projet ANR CARTES [1] *en cours vise à développer un système automatique d'acquisition photographique d'empreintes digitales sur scènes de crimes et délits pour les agents de la force publique. Nous proposons pour cela un système complet, du dispositif physique d'acquisition au logiciel permettant de délivrer automatiquement une image numérique d'empreinte redressée. La solution retenue est innovante, car elle repose sur la prise d'une* ***unique*** *image en couleurs de la scène, sur laquelle est projetée une information lumineuse structurée. Ainsi, le système est portatif et d'utilisation aussi aisée qu'un appareil photo. Le prototype du système n'étant pas terminé à l'heure actuelle, notre étude montre la faisabilité des solutions proposées par des simulations au moyen d'un logiciel de rendu par lancer de rayons.*

Mots Clef

Reconstruction 3D, projection de lumière structurée, acquisition photographique, empreinte digitale

Abstract

The ongoing project ANR CARTES [1] *aims at developing an automatic photographic acquisition system to capture images of fingerprints on crime scenes for the public force. For this, we propose a complete system, from the physical acquisition device to the software that automatically yields a digital image of the unwarped fingerprint. The proposed technological solution is innovative, as it relies on a* ***single*** *captured color image of the scene, on which structured light is projected. Thus, the system is portable and as easy to use as a standard camera. Since the prototype is not finalized at the present time, our study focuses on the feasibility of the proposed solutions by means of simulations with a raytracer.*

Keywords

3D reconstruction, projection of structured light, photographic acquisition, fingerprint

1 Introduction

1.1 Contexte

La criminalistique est l'ensemble des techniques mises en œuvre par la justice et la police pour établir la preuve d'un délit ou d'un crime et pour en identifier son auteur. Parmi celles-ci, le recueil d'empreintes digitales joue un rôle majeur. Elles sont généralement invisibles à l'œil nu mais sont révélées à l'aide d'une poudre monochrome appliquée au pinceau. Elles sont ensuite prélevées à l'aide d'un ruban adhésif pour être analysées et identifiées au retour en laboratoire. Deux défauts sont inhérents à cette méthode manuelle :

- même si l'opérateur est un professionnel expérimenté, le détérioration involontaire de l'empreinte lors de son prélèvement n'est pas à exclure ;
- le recueil et l'analyse en masse d'empreintes ne sont pas aisés et nécessitent une procédure lourde, lente et coûteuse ;
- le prélèvement de l'empreinte la retire du support, pouvant ainsi priver la police de preuves supplémentaires.

L'objectif du projet [1] est de proposer un système complet d'acquisition photographique numérique des empreintes digitales, dans le but de simplifier et d'accélérer le traitement et l'analyse de ces dernières. La principale difficulté tient au fait que l'empreinte peut se trouver sur un plan oblique ou un support courbé, alors qu'il nous faut obtenir l'empreinte telle qu'on la verrait sur un plan parallèle au plan de vue. *A minima*, la distance à l'objet doit être estimée afin de fournir l'échelle de l'image. En effet, l'empreinte doit se trouver dans un référentiel normalisé, pour l'identification par comparaison dans les bases de données des forces de l'ordre. Ainsi, il est nécessaire de capturer, en même temps que l'image de l'empreinte elle-même, la géométrie 3D de la scène, sous la forme d'une valeur de

1. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet CARTES (Capture Aisée et Rapide de Traces et d'Empreintes sur Scènes) ANR-09-SECU-02-02 financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre de son programme CSOSG.

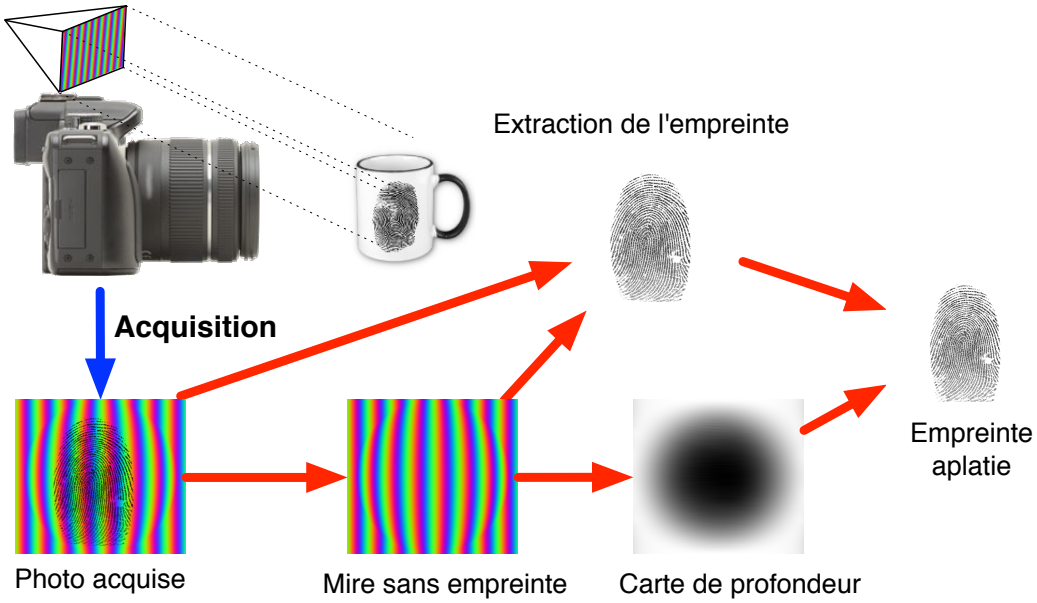


FIGURE 1 – Objectif du projet. Les flèches rouges représentent les problèmes à résoudre, pour lesquels nous proposons des solutions dans les Sections 3 à 5. Les images représentées ne sont pas des montages, elles sont réellement le résultat des algorithmes décrits dans cet article.

profondeur pour chaque pixel de l'image.

La Figure 1 présente schématiquement le défi que représente ce projet.

1.2 Principes du système proposé

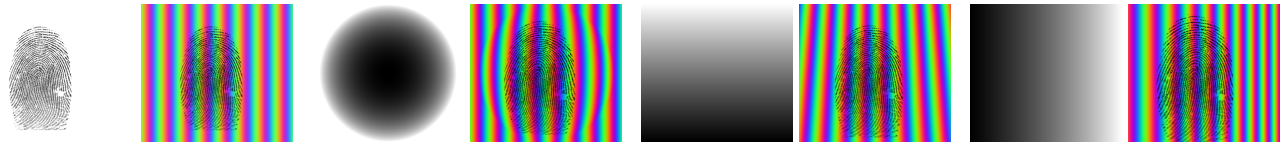
De nombreuses solutions, tant dans l'industrie que dans le milieu académique, ont été proposées afin de capturer la géométrie 3D d'une scène. Elles sont intensivement utilisées pour le contrôle qualité (profilométrie), la médecine, la réalité virtuelle et augmentée, la robotique, l'archéologie... Les méthodes dites passives [20], comme la stéréoscopie, nécessitent plusieurs vues calibrées les unes par rapport aux autres, et donc plusieurs appareils photo [1, 11], ce qui est exclu dans le projet pour des raisons de portabilité, de coût et de généricité du système. Parmi les méthodes actives, basées sur la détection d'un rayonnement spécifique réfléchi sur l'objet, on trouve le balayage par faisceau laser, qui est également exclu pour des raisons de coût et parce qu'il est impossible de garantir l'immobilité de l'opérateur durant l'acquisition qui peut durer plusieurs secondes. Nous nous sommes donc orientés vers les méthodes par projection de lumière structurée [19, 18, 5], qui peuvent être réalisées à l'aide d'appareils standards grand public, comme un appareil photo et un projecteur LCD pour projeter la mire. La géométrie de la scène est obtenue en analysant les déformations des motifs lumineux projetés, tels qu'ils apparaissent dans l'image. Il existe une littérature abondante sur le sujet, et les développements récents se concentrent surtout sur la vitesse de reconstruction [16, 25], mais la plupart des méthodes ne reconstruisent que la carte de profondeur, sans la texture de la surface.

Le système proposé pour l'acquisition se compose d'un appareil photo numérique sur lequel sont greffés des accessoires spécifiquement conçus pour le projet. À partir d'une **unique** image couleurs prise à la volée (sans référentiel ni aucune contrainte géométrique entre l'objet photographié et le photographe), il s'agit ensuite de soumettre l'image à un logiciel qui doit, de manière automatique,

1. déduire des déformations de la mire la géométrie 3D de la scène, sous la forme d'une carte de profondeur. Ce problème est étudié en Section 3.
2. séparer l'information de texture couleurs (la scène) de la mire. Ce problème est étudié en Section 4.
3. redresser l'image de l'empreinte en "dépliant" la surface 3D afin d'obtenir l'empreinte telle qu'elle aurait été déposée sur un plan orthogonal à l'axe optique du système. Ce problème est étudié en Section 5.

1.3 Simulations

Afin de tester les différentes étapes d'analyse du système proposé, nous avons programmé un simulateur basé sur un moteur de rendu de scènes 3D par lancer de rayons. Celui-ci permet de reproduire les phénomènes physiques (réflexion et réfraction) de la lumière en prenant en compte la nature et la couleur des matériaux constituant l'objet et l'environnement de la scène. Avec cette approche, à partir d'une carte de profondeur connue, nous pouvons simuler les déformations de la lumière structurée sur l'objet. Nous pouvons également ajouter une texture d'empreinte sur l'objet. La Figure 2 présente des exemples d'images obtenues par le simulateur, utilisant une lumière structurée. La Figure 2-c) présente le résultat de simulation sur un



(a) (b) (c) (d) (e)

FIGURE 2 – a) Une empreinte digitale numérisée. b) L'empreinte précédente sur un support plan avec une mire projetée simulée. c-e) À gauche, la carte de profondeur (plus le pixel est clair, plus la profondeur est importante), à droite, l'empreinte et la lumière projetée avec des déformations induites par la profondeur.

FIGURE 3 – Motif de lumière structurée projeté sur la scène.

plan intersectant une sphère (à gauche, la carte de profondeur et à droite le résultat de la simulation). Les Figures 2-d) et e) illustrent la déformation de la texture sur deux plans inclinés différents.

2 Modèle de formation d'image et formulation des problèmes

La lumière structurée que nous utilisons est une lumière couleurs dont chacun des trois canaux rouge (R), vert (G), bleu (B) a une amplitude sinusoïdale le long de la direction horizontale, déphasée de $2\pi/3$ par rapport aux deux autres. Ce motif de mire est illustré par la Figure 3. La mire est projetée à l'aide d'un système télécentrique, incliné vers le bas, ce qui signifie que tous les rayons de lumière projetés sont parallèles et chacun est inclus dans un plan vertical parallèle à l'axe optique. Ainsi, la fréquence de la mire ne varie pas avec la distance de l'objet sur lequel elle est projetée. De cette façon, tout point de coordonnées (x, y, z) de la scène 3D est illuminé par la radiance qui s'écrit, dans chacune des bandes R, G, B,

$$r^R(x, y, z) = p(1 + \cos(f.x - 2\pi/3)), \quad (1)$$
$$r^G(x, y, z) = p(1 + \cos(f.x)), \quad (2)$$
$$r^B(x, y, z) = p(1 + \cos(f.x + 2\pi/3)), \quad (3)$$

pour tout $x, y \in \mathbb{R}$, avec p, la puissance du projecteur de lumière et f, la fréquence des sinusoïdes.
L'objectif de l'appareil photo a, lui, un point focal, ce qui signifie que, dans l'image acquise, la mire apparaît localement avec une fréquence d'autant plus faible que l'objet est proche, comme l'illustre la Figure 4. Ce sont ces déformations induites par la perspective au point d'observation qui sont utilisées pour inférer la profondeur 3D en tout point de l'image.
Ainsi, nous modélisons chaque valeur de pixel de l'image acquise $\mathbf{v} = (v^R, v^G, v^B)$ par

$$\begin{aligned} v^R[k_1, k_2] &= u^R[k_1, k_2](a^R + p(1 + \cos(g[k_1, k_2] - \tfrac{2\pi}{3}))) \\ v^G[k_1, k_2] &= u^G[k_1, k_2](a^G + p(1 + \cos(g[k_1, k_2]))) \\ v^B[k_1, k_2] &= u^B[k_1, k_2](a^B + p(1 + \cos(g[k_1, k_2] + \tfrac{2\pi}{3}))) \end{aligned} \quad (4)$$

où $\mathbf{k} = (k_1, k_2) \in \mathbb{Z}^2$ est la position du pixel, g est l'image de phase, la constante p modélise la puissance du projecteur, $\mathbf{a} = (a^R, a^G, a^B)$ représente la couleur de la lumière ambiante, supposée d'amplitude constante dans l'image, et $\mathbf{u} = (u^R, u^G, u^B)$ est l'image couleurs de texture de la scène.
Ce modèle simple suppose que la radiance, dans une des bandes R, G, B, d'un rayon lumineux réfléchi par l'objet en un point (x, y, z) et contribuant au pixel (k_1, k_2) est égal au produit de la réflectance de l'objet en ce point et de la radiance du rayon lumineux incident. Ainsi, ce modèle de réflexion diffuse ne prend pas en compte les aspects lambertien et spéculaire de l'interaction entre les rayons lumineux et la surface des objets.
Ainsi, si le projecteur de lumière structurée était éteint, nous obtiendrions l'image

$$\tilde{v}^R[k_1, k_2] = a^R.u^R[k_1, k_2], \quad (5)$$
$$\tilde{v}^G[k_1, k_2] = a^G.u^G[k_1, k_2], \quad (6)$$
$$\tilde{v}^B[k_1, k_2] = a^B.u^B[k_1, k_2]. \quad (7)$$

Le défi de notre projet consiste donc, à partir uniquement de l'image acquise $\mathbf{v}$, à retrouver les inconnues que sont l'image de texture $\mathbf{u}$, les valeurs a^R, a^G, a^B, p et l'image de phase g. Il s'agit clairement d'un problème inverse mal posé, d'autant plus qu'en réalité l'image $\mathbf{v}$ est corrompue par des distorsions, comme du bruit ou des harmoniques supérieurs dus aux non-linéarités du dispositif de projection et du capteur. Ensuite, il faut calculer une image de profondeur h à partir de g et l'utiliser pour redresser l'image $\mathbf{u}$, en la déformant par interpolation.
Notons que le problème considéré, qui consiste à retrouver pour chaque pixel 4 inconnues à partir de 3 données, a des points communs avec le problème classique du *dématriçage* en traitement d'image [3], au sens où l'informa-

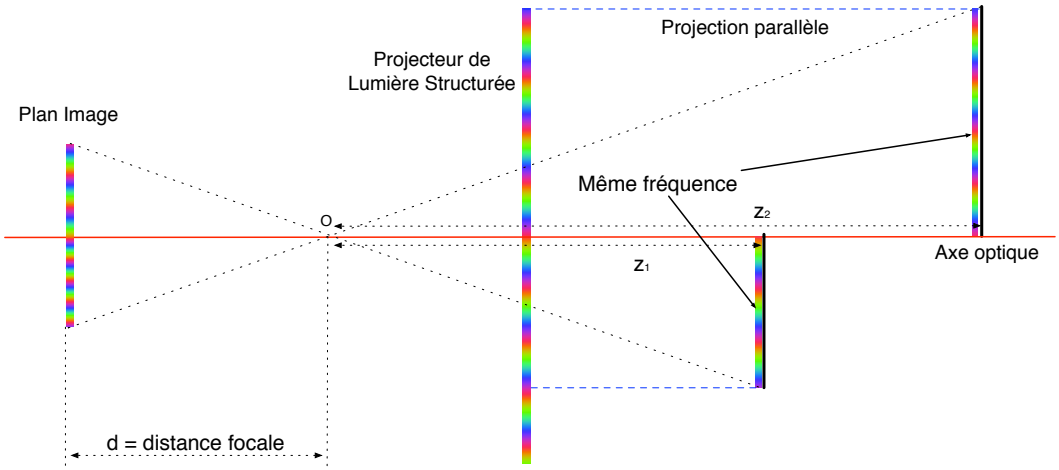


FIGURE 4 – Représentation schématique de l'image (inversée) acquise lorsque la scène est composée de deux demi-plans blancs orthogonaux à l'axe optique. On illustre ainsi le fait que la fréquence des sinusoïdes telles qu'elles apparaissent en un point de l'image est proportionnelle, dans ce cas, à la distance du point correspondant de l'objet au point focal.

tion manquante (la profondeur dans notre cas) est encodée d'une certaine manière dans le spectre de l'image disponible. C'est ce parallèle qui a motivé le choix de sinusoïdes couleurs comme *porteuses* modulant l'information manquante, comme dans [3] (où c'est la chrominance qui est modulée sinusoïdalement).

3 Analyse des déformations de la mire

3.1 Extraction de la phase enroulée

Le premier problème considéré consiste à retrouver en chaque pixel (k_1, k_2) la phase *enroulée*, c'est à dire la valeur $g[k_1, k_2]$ modulo 2π, comprise dans $]-\pi, \pi]$. Nous décrivons dans cette section les approches classiques de la littérature pour ce problème [13], que sont le décalage de phase (*Phase Stepping*), la démodulation directe de la phase (*Spatial Phase Detection* ou *Direct Phase Demodulation*), la transformée de Fourier à fenêtre, et la transformée en ondelettes.

Décalage de phase. Cette approche est adaptée au cas où plusieurs images de la scène sont acquises, la mire étant déphasée entre les images. Dans notre cas, puisque nous n'avons qu'une seule image, il est possible de considérer les trois canaux R, G, B comme trois images en niveaux de gris avec des mires monochromes déphasées, comme dans [14], mais cette approche n'est valide que dans le cas où les objets de la scène seraient blancs. Dans notre cas, où l'image de texture peut être arbitraire, le fait que la couleur $\mathbf{u}[k_1, k_2]$ en un point donné soit inconnue ne permet pas de retrouver la phase, à partir d'un calcul utilisant uniquement les valeurs locales $v^R[k_1, k_2]$, $v^G[k_1, k_2]$, $v^B[k_1, k_2]$.

Démodulation directe de la phase. Le principe de cette méthode est proche de celui de la démodulation en radio FM [15]. La phase est obtenue par remodulation avec deux sinusoïdes en quadrature, puis filtrage passe-bas. Bien qu'une seule image soit nécessaire, cette approche n'est pas adaptée à notre étude car les équations (4) montrent un double modulation en amplitude et en fréquence.

Transformée de Fourier à fenêtre. Le principe de cette méthode est de décomposer l'image d'entrée en faisant apparaître deux exponentielles complexes puis d'effectuer une transformée de Fourier selon x de l'image ainsi obtenue [23]. En isolant le terme représentant le spectre des franges déformées et en effectuant une transformée de Fourier inverse, on obtient les parties réelle et imaginaire du signal. La phase se déduit en calculant la tangente inverse du rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle. Cette approche est adaptée à notre problème mais elle est très sensible au choix de la taille de la fenêtre, pour lequel il n'existe pas de critère de choix.

Transformée en ondelettes. La transformée en ondelettes est un outil multi-résolution performant pour l'analyse des franges et fournit de meilleurs résultats que les méthodes utilisant la transformée de Fourier [13]. Les ondelettes de Morlet sont connues pour fournir le meilleur compromis entre localisations spatiale et fréquentielle [4]. L'ondelette unidimensionnelle s'exprime comme

$$h(x) = \pi^{1/4} e^{icx} e^{-x^2/2}. \tag{8}$$

La phase se déduit en effectuant la tangente inverse du rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle de la transformée en ondelettes.
Nous avons adopté cette approche dans notre étude, car elle est robuste aux distorsions comme la présence de bruit ou d'harmoniques supérieurs [13]. L'utilisation d'une transformée en ondelettes 2D améliorerait encore la robustesse de la détection, au prix d'un temps de calcul

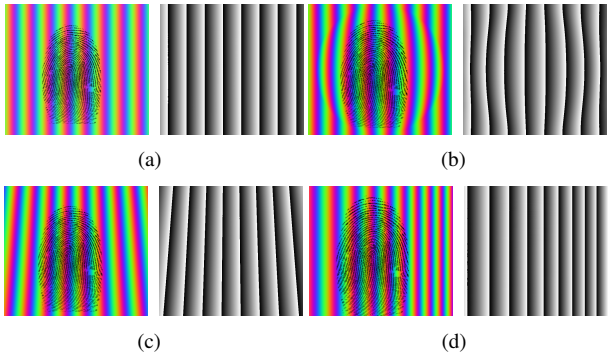


FIGURE 5 – Résultats de l'extraction de la phase enroulée par la méthode proposée pour quatre exemples de déformations différentes. À gauche, l'image $\mathbf{v}$, à droite l'image de phase g calculée, où le noir correspond à la valeur $-\pi$ et le blanc à la valeur π. a) Simulation sur un plan orthogonal à l'axe optique. b) Simulation sur un plan intersectant une sphère, orthogonal à l'axe optique. c-d) Simulation sur un plan incliné.

beaucoup plus important. Nous n'avons pas retenu cette solution puisque les franges que nous analysons sont majoritairement verticales.

Pour chaque pixel de l'image, nous définissons une valeur complexe dont les parties réelle et imaginaire sont les deux valeurs de chrominance (définies en Section 4). Nous calculons la transformée en ondelette ligne par ligne, considérant ainsi chaque ligne de notre image comme un signal 1D complexe. Afin de déterminer les coefficients en ondelettes optimaux, nous effectuons un balayage exhaustif des échelles de l'ondelette dans un intervalle en raffinant la recherche par dichotomie jusqu'à trouver l'échelle qui maximise le module du coefficient complexe. À l'échelle trouvée, la phase du coefficient d'ondelette nous fournit la phase $g[k_1, k_2]$ et son module nous fournit, après moyennage sur l'image, la puissance p.
La Figure 5 présente des résultats du calcul de la phase sur des simulations pour plusieurs cartes de profondeur : a) un plan orthogonal à l'axe optique, b) un plan intersectant une sphère, orthogonal à l'axe optique, c) un plan incliné selon l'axe y et d) un plan incliné selon l'axe x.
Précisons que cette étape, ainsi que les suivantes, ont été programmées sans précautions particulières aux bords de l'image, et la phase puis la profondeur calculées peuvent donc être erronées sur une bande de quelques pixels aux bords de l'image. L'optimisation du code pour un traitement optimal des bords sera faite ultérieurement.

3.2 Déroulement de phase

Les méthodes d'extraction de phase que nous avons présentées dans la section précédente fournissent une phase enroulée, comprise entre $-\pi$ et π et l'image de phase obtenue comporte donc des discontinuités (sauts de phase de

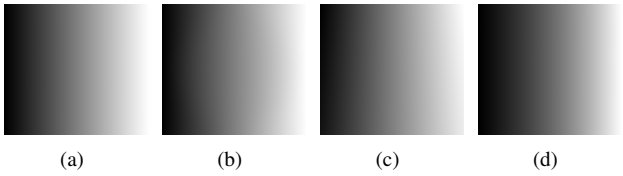


FIGURE 6 – Résultats obtenus après le déroulement de phase. a-d) Phase déroulée pour les simulations présentées sur les Figures 5-a-d). Les valeurs de pixels ont été normalisées afin que les images puissent être visualisées comme des images en niveau de gris. Ainsi la phase déroulée, qui est croissante, apparaît comme un dégradé du noir vers le blanc

2π). Il est donc nécessaire d'utiliser ensuite un algorithme de déroulement de phase (*phase unwrapping*) [6] afin d'obtenir la phase réelle g. L'idée sous-jacente à ces méthodes est d'ajouter des multiples de 2π à chaque valeur $g[k_1, k_2]$ afin d'obtenir une image déroulée lisse, en un certain sens, c'est-à-dire sans saut de phase. Le déroulement de phase est un problème classique en imagerie radar, interférométrie, imagerie par résonance magnétique… Une revue récente des méthodes de déroulement de phase 2D est réalisée dans [6].

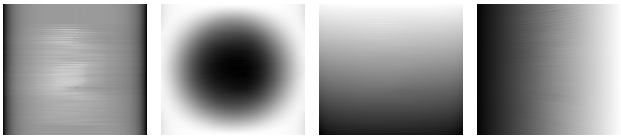
Dans notre contexte, les objets que nous souhaitons reconstruire ne présentent pas de discontinuité forte des franges analysées. Après avoir implémenté et comparé plusieurs méthodes, nous avons retenu la méthode classique de Goldstein [8], qui est simple, rapide et robuste. Les méthodes globales par minimisation d'énergie n'apportent pas de gain significatif, pour un temps de calcul nettement supérieur.

3.3 Calcul de la profondeur

La dernière étape de l'analyse de la lumière structurée est la conversion de l'image de phase déroulée en une carte de profondeur, afin d'associer à tout pixel de l'image d'empreinte extraite (voir Section 4) une information de profondeur. Ainsi, c'est un modèle d'empreinte dit *2,5D* que nous reconstruisons, c'est-à-dire que nous ne pouvons reconstruire qu'une certaine classe seulement de surfaces 3D.

En ayant connaissance des paramètres géométriques intrinsèques du système, il est possible de décrire la transformation entre le monde réel 3D et les coordonnées 2D dans l'image.

Désignons par θ le champ de vue horizontal (qui dépend de la distance focale d entre le point focal et le capteur), et par W et H les tailles horizontale et verticale du capteur, respectivement. Alors, $\forall \mathbf{k} = [k_1, k_2] \in [0, \ldots, W-1] \times [0, \ldots, H-1]$, le pixel $v[\mathbf{k}]$ correspond au point objet de coordonnées réelles $(X[\mathbf{k}], Y[\mathbf{k}], Z[\mathbf{k}])$ touché par le rayon passant par le point focal et le photosite $\mathbf{k}$ du capteur. On suppose que le rayon au pixel $[W/2, H/2]$ est orthogonal



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 7 – Résultats obtenus après le calcul de la profondeur à partir des images présentées en Figure 6. Les valeurs de pixels ont été normalisées afin que les images puissent être visualisées comme des images en niveau de gris. Cette égalisation d'histogramme peut prêter à confusion pour l'image (a), alors que la profondeur reconstruite est presque constante, comme attendu.

au plan focal. On a donc :

$$X[\mathbf{k}] = \frac{2}{W}\tan(\theta/2)(k_1 - W/2)Z[\mathbf{k}], \quad (9)$$

$$Y[\mathbf{k}] = \frac{2}{W}\tan(\theta/2)(k_2 - H/2)Z[\mathbf{k}], \quad (10)$$

$$g[\mathbf{k}] = f.X[\mathbf{k}]. \quad (11)$$

En réécrivant les coordonnées en fonction de la phase $g[\mathbf{k}]$ calculée à l'étape précédente, nous obtenons :

$$Z[\mathbf{k}] = \frac{W}{2f\tan(\theta/2)}\frac{g[\mathbf{k}]}{k_1 - W/2}, \quad (12)$$

$$X[\mathbf{k}] = \frac{g[\mathbf{k}]}{f}, \quad (13)$$

$$Y[\mathbf{k}] = \frac{k_2 - H/2}{f(k_1 - W/2)}g[\mathbf{k}]. \quad (14)$$

On remarque que pour $k_1 = W/2$, les informations Z et Y ne peuvent pas être reconstruites. Nous utilisons donc l'algorithme suivant :

- on reconstruit $Z[\mathbf{k}]$ pour tout $\mathbf{k}$ tel que $k_1 \neq W/2$.
- on interpole la colonne centrale pour $k_1 = W/2$ à partir des colonnes précédente et suivante.
- on effectue une interpolation bilinéaire de l'image Z définie sur l'ensemble des points non uniformes de coordonnées réelles $(X[\mathbf{k}], Y[\mathbf{k}])$ pour obtenir la carte de profondeur h correspondant à un échantillonnage cartésien du plan. Le même rééchantillonnage est réalisé en parallèle sur l'image de texture extraite afin de l'aplanir (voir Section 5).

La Figure 7 présente des résultats du calcul de profondeur sur des images simulées.

4 Extraction de la texture

L'extraction de la texture $\mathbf{u}$ est une étape essentielle de notre projet. En effet, l'identification des personnes s'effectue à partir des empreintes seules, alors que dans les images acquises la mire couleurs est superposée à l'empreinte.

Il est connu que les canaux R, G, B d'une image naturelle ne sont pas indépendants [12, 10], c'est pour cela que nous considérons la base orthogonale composée de la luminance et des valeurs de chrominances rouge-vert et bleu-jaune. Soit un vecteur $\mathbf{q}$ représenté dans l'espace R, G, B par $[q^R, q^G, q^B]$, ses composantes dans l'espace luminance/chrominance, $[q^L, q^{C_1}, q^{C_2}]$ s'obtiennent par :

$$\begin{aligned} q^L &= \frac{1}{\sqrt{3}}(q^R + q^G + q^B), \\ q^{C_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(q^G - q^R), \\ q^{C_2} &= \frac{1}{\sqrt{6}}(2q^B - q^R - q^G). \end{aligned} \quad (15)$$

L'approche variationnelle retenue consiste à chercher l'image de texture $\mathbf{u}$ et la lumière ambiante $\mathbf{a}$ minimisant un critère quadratique des moindres carrés régularisés. La régularisation de type Tikhonov retenue est séparable dans la base L, C_1, C_2. Notre problème d'optimisation prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u},\mathbf{a}} \mathcal{C}(\mathbf{u},\mathbf{a}) = \sum_{[k_1,k_2]\in\Omega} |v^R[\mathbf{k}] - u^R[\mathbf{k}]b^R[\mathbf{k}]|^2 + \\ |v^G[\mathbf{k}] - u^G[\mathbf{k}]b^G[\mathbf{k}]|^2 + |v^B[\mathbf{k}] - u^B[\mathbf{k}]b^B[\mathbf{k}]|^2 + \\ \lambda\|\nabla u^L[\mathbf{k}]\|^2 + \mu\|\nabla u^{C_1}[\mathbf{k}]\|^2 + \mu\|\nabla u^{C_2}[\mathbf{k}]\|^2, \end{aligned} \quad (16)$$

dans lequel nous avons introduit le vecteur $\mathbf{b}[\mathbf{k}] = [b^R[\mathbf{k}, b^G[\mathbf{k}, b^B[\mathbf{k}]]$ dont les composantes sont définies ainsi :

$$\begin{aligned} b^R[\mathbf{k}] &= a^R + p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}] - 2\pi/3)\big), \\ b^G[\mathbf{k}] &= a^G + p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}])\big), \\ b^B[\mathbf{k}] &= a^B + p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}] + 2\pi/3)\big). \end{aligned} \quad (17)$$

On note $\|\nabla u\|^2$ le produit scalaire $< u, u * r >$ calculé à l'aide du filtre laplacien :

$$r = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Les paramètres λ et μ sont importants, car ils établissent le compromis entre la régularité de la luminance et celle de la chrominance. Pour l'instant, ils sont choisis de manière empirique.

La solution de ce problème est obtenue en annulant les dérivées partielles de $\mathcal{C}$ par rapport aux inconnues $u^R[\mathbf{k}]$, $u^G[\mathbf{k}]$, $u^B[\mathbf{k}]$, a^R, a^G et a^B. Nous obtenons ainsi le sys-

tème d'équations suivant pour $\mathbf{u}$:

$$\begin{aligned}
v^R[\mathbf{k}]b^R[\mathbf{k}] &= u^R[\mathbf{k}](b^R[\mathbf{k}])^2 + (\frac{\lambda}{3} + \frac{2\mu}{3})(u^R * r)[\mathbf{k}] + \\
&(\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^G * r)[\mathbf{k}] + (\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^B * r)[\mathbf{k}], \\
v^G[\mathbf{k}]b^G[\mathbf{k}] &= u^G[\mathbf{k}](b^G[\mathbf{k}])^2 + (\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^R * r)[\mathbf{k}] + \\
&(\frac{\lambda}{3} + \frac{2\mu}{3})(u^G * r)[\mathbf{k}] + (\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^B * r)[\mathbf{k}], \\
v^B[\mathbf{k}]b^B[\mathbf{k}] &= u^B[\mathbf{k}](b^B[\mathbf{k}])^2 + (\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^R * r)[\mathbf{k}] + \\
&(\frac{\lambda}{3} - \frac{\mu}{3})(u^G * r)[\mathbf{k}] + (\frac{\lambda}{3} + \frac{2\mu}{3})(u^B * r)[\mathbf{k}],
\end{aligned} \tag{19}$$

et le système d'équations pour calculer $\mathbf{a}$:

$$\begin{aligned}
\sum_{\mathbf{k}} u^R[\mathbf{k}]v^R[\mathbf{k}] &= \sum_{[\mathbf{k}]} u^R[\mathbf{k}]^2(a^R + s^R[\mathbf{k}]), \\
\sum_{\mathbf{k}} u^G[\mathbf{k}]v^G[\mathbf{k}] &= \sum_{[\mathbf{k}]} u^G[\mathbf{k}]^2(a^G + s^G[\mathbf{k}]), \\
\sum_{\mathbf{k}} u^B[\mathbf{k}]v^B[\mathbf{k}] &= \sum_{[\mathbf{k}]} u^B[\mathbf{k}]^2(a^B + s^B[\mathbf{k}]),
\end{aligned} \tag{20}$$

dans lequel nous avons introduit le vecteur $\mathbf{s}[\mathbf{k}] = [s^R[\mathbf{k}], s^G[\mathbf{k}], s^B[\mathbf{k}]]$:

$$\begin{aligned}
s^R[\mathbf{k}] &= p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}] - 2\pi/3)\big), \\
s^G[\mathbf{k}] &= p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}])\big), \\
s^B[\mathbf{k}] &= p\big(1 + \cos(g[\mathbf{k}] + 2\pi/3)\big).
\end{aligned} \tag{21}$$

Le problème d'optimisation étant quadratique donc convexe, nous utilisons une approche alternée. Nous extrayons la texture $\mathbf{u}$ pour une lumière ambiante $\mathbf{a}$ fixé, en résolvant approximativement le système d'équations linéaires par la méthode du gradient conjugué, avec un nombre fini d'itérations. À partir du $\mathbf{u}$ estimé, nous déterminons $\mathbf{a}$ de manière directe par une régression des moindres carrés sur l'image (c'est-à-dire que nous obtenons $\mathbf{a}$ en résolvant (20) par une inversion de matrice 3×3). Et nous réitérons ce processus alterné jusqu'à convergence. La Figure 8 présente des résultats d'estimation conjointe de $\mathbf{u}$ et $\mathbf{a}$ après différents nombres totaux d'itérations. Nous remarquons que le processus converge vers une solution. La vitesse de convergence dépend fortement des valeurs de μ et λ et reste à étudier plus précisément. Nous avons constaté empiriquement que le processus d'extraction de la texture $\mathbf{u}$ est robuste à l'estimation approximative de $\mathbf{a}$.

5 Aplatissement de la texture

Le problème d'aplatissement, qui consiste à représenter sur un plan une texture présente sur une surface arbitraire, est bien connu des cartographes [21, 24]. Son étude ne se limite pas à la recherche en Systèmes d'Informations Géographiques (*SIG*), des domaines tels que l'imagerie médicale, la reconnaissance de surface ou le design industriel se sont également intéressés à cette problématique [7, 22, 17].

Toutes les méthodes d'aplatissement déforment la surface d'une certaine manière. Toutefois, différentes méthodes de projection existent et préservent certaines propriétés de l'objet 3D au détriment d'autres [24]. L'aplatissement d'une surface est facilement réalisable pour une surface dont la courbure gaussienne est nulle en tout point (par exemple un demi-cylindre) mais dans le cas général, par exemple pour une sphère, ce problème est mal posé.

Dans le cas spécifique de l'aplatissement des empreintes digitales, quelques approches informatiques ont été développées. Chen et coll. reconstruisent un modèle 3D d'empreinte digitale et proposent une approche de déroulement dans [2]. Leur approche reproduit numériquement le déroulement du doigt qui se pose sur une surface plane.

Dans notre étude, la déformation que nous appliquons à l'empreinte vise à estimer l'image telle qu'elle apparaîtrait sur une plan orthogonal à l'axe optique. Pour ce faire, une simple interpolation bilinéaire est actuellement réalisée. Pour nous, le critère de qualité de l'aplatissement sera l'amélioration du taux de reconnaissance des empreintes par rapport à l'image d'empreinte non redressée. Cette validation n'a pas encore été réalisée mais un ensemble de tests à partir de simulations sur de grandes bases d'images d'empreintes puis à partir d'acquisitions réelles d'empreintes avec le prototype est prévu.

6 Conclusion

La proposition réalisée dans cet article d'un système complet d'acquisition photographique d'empreintes digitales montre qu'un appareil photo muni d'un projecteur de lumière structurée est une alternative viable à la prise d'empreintes traditionnelle. Les résultats des algorithmes proposés sur des images d'empreintes simulées sont prometteurs.

L'approche variationnelle développée pour l'extraction de la texture et l'estimation de la lumière ambiante conjointement a montré son efficacité et sa robustesse sur des simulations. D'autres mesures de performance sont en cours afin de déterminer de manière judicieuse les paramètres de notre modèle. L'étude de formulations alternatives reposant sur la parcimonie ou la minimisation de variation totale sont en cours.

Les applications potentielles pour le cadre méthodologique que nous avons développé sont nombreuses et vont bien au-delà de l'acquisition d'empreintes. Des objets 3D arbitraires peuvent être acquis, par exemple des modèles 3D de visages pour la biométrie, un domaine en plein essor [9].

Références

[1] Sylvie Chambon. *Mise en Correspondance Stéréoscopique d'Images Couleurs en Présence d'Occultations*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2005.

[2] Yi Chen, G. Parziale, E. Diaz-Santana, and A.K. Jain. 3D touchless fingerprints : Compatibility with legacy rolled images. In *Biometric Consortium Conference,*

$[0, 0, 0]$ $[0.174, 0.189, 0.177]$ $[0.177, 0.188, 0.1819]$ $[0.185, 0.193, 0.192]$ $[0.188, 0.193, 0.196]$

FIGURE 8 – Résultats de l'extraction de l'image de texture (en haut) et de l'estimation de la lumière ambiante $\mathbf{a}$ (valeur réelle $[0.2, 0.2, 0.2]$) après respectivement, de gauche à droite, 0 , 50, 100, 200 itérations et à convergence ($\approx$ 900 itérations).

2006 Biometrics Symposium : Special Session on Research at the, pages 1–6, Aug. 2006.

[3] Laurent Condat. A new color filter array with optimal properties for noiseless and noisy color image acquisition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(8) :2200–2210, 2011.

[4] Ali Dursun, Serhat Özder, and F. N. Ecevit. Continuous wavelet transform analysis of projected fringe patterns. *Measure Science and Technology*, 2004.

[5] J. Geng. Structured-light 3D surface imaging : A tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2) :128–160, 2011.

[6] Denis C. Ghiglia and Mark D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping : Theory, Algorithms and Software*. A Willey-Interscience Publication, 1998.

[7] Andrew S. Glassner. *Graphics Gems*. Elsevier, 1998.

[8] Richard M. Goldstein, Howard A. Zebker, and Charles L. Werner. Satellite radar interferometry : Two-dimensional phase unwrapping. *Radio science*, 23(4), 1988.

[9] Souhila Guerfi. *Authentification d'individus par reconnaissance de caractéristiques biométriques liées aux visages 2D/3D*. PhD thesis, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2008.

[10] Bahadir K. Gunturk, John Glotzbach, Yucel Altunbasak, Ronald W. Schafer, and Russel M. Mersereau. Demosaicking : Color filter array interpolation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005.

[11] Jacques Harvent. *Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméra*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2010.

[12] Yacov Hel-Or. The canonical correlations of color images and their use for demosaicing. Technical report, HP Laboratories Israel, 2004.

[13] Lei Huang, Quian Kemao, Bing Pan, and Anand Krishna Asundi. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 48 :141–148, 2010.

[14] Peisen S. Huang, Qingying Hu, Fend Jin, and Fu-Pen Chiang. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three dimensional surface contouring. *Optical Engineering*, 38, 1999.

[15] Y. Ichioka and M. Inuiya. Direct phase detection system. *Applied Optics*, 1972.

[16] N. Karpinsky and S. Zhang. High-resolution, real-time 3D imaging with fringe analysis. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2010.

[17] Yasuyo Kita, Dale L. Wilson, and J. Alison Noble. Real-time registration of 3D cerebral vessels to X-ray angiograms. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 1998.

[18] Joaquim Salvi, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanic, and Xavier Llado. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*, 43, 2010.

[19] Joaquim Salvi, Jordi Pagès, and Joan Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37(4), 2004.

[20] Steven Seitz. An overview of passive vision techniques. In *SIGGRAPH, Course on 3D Photography*, 2000.

[21] John P. Snyder. *Flattening the earth : Two thousand years of map projections*. The University of Chicago Press, 1998.

[22] Dennis Summers. *Texturing : Concepts and techniques*. Charles River Media Graphics, 2004.

[23] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-base topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 72, 1982.

[24] Q. Yang, John. P. Snyder, and Walter R. Tolber. *Map projection transformation*. Taylor and Francis, 2000.

[25] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT)*, pages 24–36, June 2002.